

NRCS-CN 방법을 이용한 유역평균 유효우량 산정기법의 비교·분석

문건우* · 유지영** · 안재현*** · 김태웅****

Moon, Geon-Woo*, Yoo, Ji-Young**, Ahn, Jae-Hyun***, Kim, Tae-Woong****

Comparative Analysis of Estimation Methods for Basin Averaged Effective Rainfall Using NRCS-CN Method

ABSTRACT

The NRCS-CN method is generally applied for estimating effective rainfalls in practice, in which the basin-averaged CN is normally used. In order to develop a more appropriate method for estimating effective rainfalls in a basin, this study compared estimated effective rainfalls from two distinct methods with the observed direct runoff. The first method is to estimate the basin-representative effective rainfall using the basin-averaged CN (hereafter, effective rainfall I), whereas the second method to estimate the basin-averaged effective rainfall through areal-averaging sub-area effective rainfalls corresponding to the soil type and landuse type (hereafter, effective rainfall II). The overall results indicated that the effective rainfall II was higher than the effective rainfall I and closer to the observed direct runoff. The study also performed error analyses to verify that the effective rainfall II can be applied in practice in a basin as more accurate estimate of basin-representative effective rainfall.

Key words : Rainfall-Runoff, Effective rainfall, Direct runoff, NRCS-CN method

초록

국내 유역에서 유효우량을 산정하기 위한 방법으로 주로 유역 평균 CN을 적용하는 NRCS-CN 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 국내 유역에 적절한 유역 대표 유효우량 산정법을 개발하기 위하여, 토지이용종류별 CN을 면적가중평균한 유역 대표 CN을 이용하여 산정한 유효우량(유효우량 I)과 토지이용종류별 CN을 이용하여 소구역 유효우량을 산정한 후 면적가중평균한 유효우량(유효우량 II)을 산정한 후, 관측된 강우-유출 자료를 이용하여 산정한 직접유출량과의 비교분석을 수행하였다. 본 연구 결과, 유효우량 II가 유효우량 I 보다 전반적으로 크게 산정되었으며, 이는 유효우량 I이 가지는 관측 직접유출량과의 오차를 크게 줄여주는 것이다. 또한, 본 연구에서 수행한 오차분석은 유효우량 II가 유효우량 I 보다 관측 직접유출량에 대한 높은 정확성을 가지는 것을 보여주었다.

검색어 : 강우-유출, 유효우량, 직접유출량, NRCS-CN 방법

1. 서론

설계홍수량을 산정할 때 이용되는 강우-유출 모형은 유역 내의 유효우량과 유역출구에서의 직접유출량간의 관계를 개념적으로 표현한 것이다. 이 때, 유효우량은 기저유량과 합해져서 유역의 총유출량에 상응하는 총강우량을 형성한다. 따라서, 유효우량은 총강우량 중에서

* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (mgw10@hanyang.ac.kr)

** 정회원·전북대학교 공과대학 토목공학과 연구교수, 공학박사 (jyoo84@gmail.com)

*** 정회원·서경대학교 이공대학 토목건축공학과 부교수, 공학박사 (wrr@skuniv.ac.kr)

**** 정회원·교신저자·한양대학교 공과대학 건설환경플랜트공학과 부교수, 공학박사

(Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received October 30, 2013/ revised December 6, 2013/ accepted February 3, 2014

직접유출에 기여하는 부분으로 차단, 지면저류, 증발, 침투 등의 강우 손실분을 총강우량에서 제외하여 산정한다. 우리나라 수자원 실무에서 사용하고 있는 유효우량 산정방법에는 NRCS-CN 방법, 일정비법, 일정손실률법, 초기손실-일정손실률법, 침투곡선법 등이 있으며, 주로 NRCS-CN 방법이 사용되고 있다(MOCT, 2007; MLTM, 2010; 2012). NRCS-CN 방법은 1954년 미국 토양보존국(Soil Conservation Service, SCS)에서 개발되어 SCS-CN 방법으로 불리다가, SCS가 1994년 미국 자연보존청(Natural Resources Conservation Service, NRCS)으로 개편되면서 현재는 NRCS-CN 방법으로 불리고 있다. NRCS-CN 방법은 유출곡선지수(Curve Number, CN)를 이용하여 계측 및 미계측 유역에서 유효우량을 산정할 수 있는 방법으로 실제 유역에 대한 적용이 편리하기 때문에 국내 유역의 홍수량 산정에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나, NRCS-CN 방법은 미국 내 유역의 특성에 맞추어 개발된 방법으로 미국 유역의 토양특성, 식생피복처리상태, 토지이용상태 등을 고려하여 유출곡선지수 및 초기손실계수 등이 산정되었기 때문에, 이를 국내 유역에 그대로 적용할 경우, 많은 문제점 및 한계점을 가지게 된다. NRCS-CN 방법의 국내 유역 적용에 대한 기준은 제시되고 있지만(MOCT, 2007; MLTM, 2010; 2012), 국내 유역의 특성을 제대로 반영하는지에 대한 검토가 필요한 실정이다.

Yoon (1991)은 미계측 유역에서의 CN값 산정시 선행토양함수 조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)에 따른 보통 상태의 CN값과 습윤 상태의 CN값을 3:7로 가중평균하여 사용하는 것이 적절하다고 제시한 바 있다. 또한, 강우-유출 자료가 있을 경우에는 강우-유출 자료에서 역으로 추정된 관측 CN값(Observed CN)을 사용할 것을 권장하였다. Kim and Choi (2004)는 우리나라 정밀토양도를 이용하여 CN값을 산정하는 연구를 수행하였으며, Cho et al. (2004)은 GIS 기법을 이용하여 CN값을 산정하는 방안을 제시하였고, Park et al. (2005) and Lee et al. (2005)는 강우-유출 자료를 이용하여 관측 CN값을 산정 한 후 선행강우량 및 선행강우일수에 따른 AMC 조건에 대한 타당성을 검토한 바 있다. Yoo et al. (2005)은 선행강우일수 및 선행강우량의 기준을 변화시키면서 호우사상에 대해 빈도해석을 수행하여 국내 유역에 적절한 AMC 기준을 탐색한 바 있다. Oh et al. (2005a,b)은 국내 유역의 토지이용상태에 적합한 CN값을 산정하기 위해 도시지역 및 산지 소유역에서의 CN값을 구분하여 제시하였다. 또한, Kim et al. (2008)은 SWAT 모형에서 직접유출량을 산정하기 위하여 CN값을 시간에 따라 가중평균하여 유효우량을 산정하는 방법을 제안하였고, 국내 소유역과 대유역에 적용한 바 있다.

Haestad (2003)는 NRCS-CN 방법의 적용에 있어서 시간차원 및 강우지속시간에 대한 문제점, 초기손실계수 및 침투손실에 대한 문제점, CN값의 가중평균에 대한 문제점 등을 제시하였다. 특히,

USDA (2004)는 유역 평균 강우량이 작거나 토지이용상태에 따른 CN값의 차이가 클 경우, 토지이용종류에 따른 CN값을 가중평균한 유역 대표 CN값을 사용하여 유효우량을 산정하는 방법(가중평균 CN법)은 유역의 유효우량 산정에 큰 오차를 발생할 수 있기 때문에 토지이용종류에 따라 소구역을 나누고 소구역별 유효우량을 먼저 산정 후 이를 가중평균하는 방법(가중평균유효우량법)을 제안하였다. 이에 대한 선행연구로는 가중평균유효우량법과 가중평균CN법을 비교 분석한 Paudel et al. (2009)과 Mogeln (2000), GIS 기법을 이용하여 토지이용별 CN을 산정하여 공간적 분석을 수행한 Melesse and Shih (2002), 유역 평균 경사도를 이용하여 CN값을 보정한 후 가중평균유효우량법과 가중평균CN법을 비교 분석한 Ebrahimian et al. (2012) 등이 있다.

우리나라 수자원 실무에서는 NRCS-CN 방법을 이용하여 유역 평균 유효우량을 산정할 경우, USDA (2004)에서 제시한 가중평균 CN법과 같이, 유역 내 토지이용종류, 식생피복처리상태, 수문학적 토양군 등을 고려하여 유역을 여러 소구역으로 구분하고, 각 소구역에 적절한 CN값을 부여한 후 면적가중평균하여 유역 대표 CN값을 산정하고 이를 이용하여 유역의 유효우량을 산정한다. 이러한 가중평균CN법은 하천기본계획과 유역종합치수계획에서 설계홍수량을 산정할 때 일반적으로 적용된다. 그러나, USDA (2004)에서 제시한 가중평균유효우량법은 우리나라 유역에 적용된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 유역을 토양형과 토지이용상태에 따라 소구역으로 분할하여 소구역의 CN값을 결정하고 NRCS-CN 유효우량 산정공식을 적용하여 소구역의 유효우량을 산정한 후, 이를 면적가중평균하여 유역 평균 유효우량을 산정하는 가중평균유효우량법을 국내 유역에 적용하고, 이를 가중평균CN법과 관측 직접유출고와 비교분석하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 SCS-CN 방법 배경이론

SCS (1972)는 강우의 초기손실량(I_a)이 최대잠재보유수량(S)의 20%라고 가정하고($I_a=0.2S$), 유효우량(Q)와 총강우량(P)의 관계를 S와 CN을 이용하여 Eq. (1)과 같이 제시하였다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P \geq I_a) \quad (1a)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1b)$$

여기서, Q는 유효우량 또는 초과강우량(mm), P는 총강우량(mm),

I_a 는 초기손실량(mm), S는 최대잠재보유수량(mm), 그리고 CN은 유출곡선지수이다.

SCS (1985)는 1년을 비성수기(10월~익년 5월)와 성수기(6월~9월)로 나누어 구분하고, 선행5일강우량(Antecedent 5 Days Rainfall, P_5)을 초기토양수분량을 대변하는 지표로 사용하여 선행 토양함수조건(AMC)을 3가지로 구분하였다. AMC-I 조건(성수기 기준으로 $P_5 < 35.56$ mm)은 유역의 토양이 대체로 건조상태에 있어서 유출율이 대단히 낮은 상태를 나타내고, AMC-II 조건(성수기 기준으로 $35.56 \leq P_5 < 53.34$ mm)은 유출률이 보통인 상태, 그리고 AMC-III 조건(성수기 기준으로 $P_5 \geq 53.34$ mm)은 유역의 토양이 수분으로 거의 포화되어 있어서 유출율이 대단히 높은 상태를 나타낸다. Sobhani (1975)는 최대잠재보유수량(S)과 AMC 조건 사이에 선형적인 관계를 가지고 있음을 밝혔으며, AMC 조건에 따른 CN 변환식을 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

$$CN_I = \frac{4.2 CN_{II}}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (2a)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_{II}}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (2b)$$

여기서, CN_I , CN_{II} , CN_{III} 는 각각 AMC-I, AMC-II, AMC-III 조건에 대한 유출곡선지수이다.

2.2 대상유역 및 수문자료

본 연구는 관측유량자료를 확보할 수 있는 4개의 수위관측지점(점촌, 중랑교, 회덕, 흑천교)을 선정하고, Fig. 1과 같이 유역을

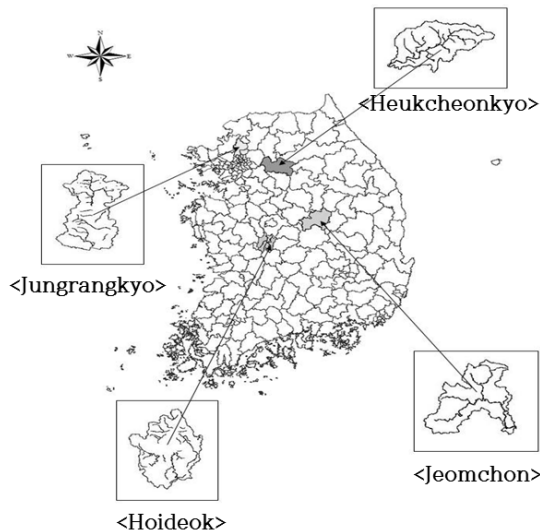


Fig. 1. Location of Study Watersheds

구분하였다. 흑천교 수위관측지점 유역(유역면적 307.82 km^2)은 경기도 양평군에 위치하고 있으며, 주로 산지 및 임야로 이루어진 소규모 유역이다. 중랑교 수위관측지점 유역(유역면적 208.41 km^2)은 서울시에 위치하고 있으며, 대표적인 도시지역 유역이다. 점촌 수위관측지점 유역(유역면적 616.77 km^2)은 경상북도 문경시에 위치하고 있으며, 주로 산지 및 임야로 이루어져 있는 중규모 유역이다. 회덕 수위관측지점 유역(유역면적 609.15 km^2)은 금강 유역에 위치하고 있으며, 시가지 및 농업지역으로 구성된 중규모 유역이다. 이들 유역은 유량조사사업단(www.hsc.re.kr)에서 유량 측정성과를 제공하고 있다.

본 연구에서는 유량조사사업단(www.hsc.re.kr)의 유량 측정성과를 비롯하여 한강, 낙동강, 금강 홍수통제소에서 관리 및 제공하는 강우량 및 유량 자료를 확보하여 대상 유역별로 정리하였다. 강우 및 유량 자료는 2007, 2008, 2010년도의 우기(6월~9월)의 시단위 자료이며, 수위관측소로부터 수위자료를 확보하여 수위-유량 관계 곡선을 이용하여 유량 자료를 구축하였다. 또한, Thiessen 방법을 사용하여 유역의 평균강우량을 산정하였다.

2.3 강우유출 사상

NRCS-CN 방법은 지속기간 24시간 이상의 강우사상에 적용되어 야하기 때문에(Kibler, 1982), 본 연구에서는 Jun and Yoo (2012)가 제안한 바와 같이 절단값 1 mm와 무강우 시간 12시간을 적용한 IETD (Inter-Event Time Definition) 기법을 이용하여 지속기간이 24시간 이상인 호우사상을 선정하였다. 선정된 호우사상에 해당하는 유출수문곡선은 Fig. 2와 같이 추출하였으며, 유출수문곡선을 적분하여 유역 면적으로 나누어 총유출고를 결정하였다. 본 연구에서는 점촌 유역 6개, 중랑교 유역 12개, 회덕 유역 8개, 흑천교 유역 6개의 강우-유출 사상이 선정되었다. NRCS-CN 방법을 적용하기 위한 사전 분석을 통해 대상 강우-유출 사상의 지속기간, 총강우량, 선행5일강우량, AMC 조건, 총유출량 등을 Table 1에 정리하였다.

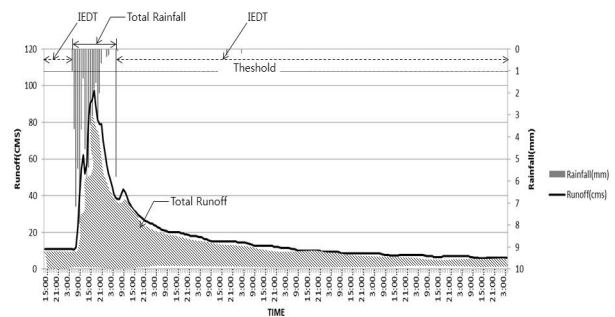


Fig. 2. Determination of Rainfall-Runoff Event

Table 1. Rainfall-Runoff Events of Study Watersheds

Watershed	Storm Duration	Rainfall Duration (hr)	Total Rainfall (mm)	Antecedent 5 Days Rainfall (mm)	AMC Condition	Total Runoff (mm)
Jeomchon	'07/09/01 ~ '07/09/02	25	97.5	134.5	III	92.8
	'07/09/04 ~ '07/09/14	49	65.3	118.7	III	88.8
	'08/08/14 ~ '08/08/18	46	131.9	59.7	III	111.0
	'10/07/16 ~ '10/07/21	29	69.4	49.4	II	30.0
	'10/08/10 ~ '10/08/13	29	91.0	62.9	III	37.0
	'10/09/11 ~ '10/09/19	34	96.6	28.0	I	24.5
Jungrangkyo	'07/07/01 ~ '07/07/03	35	75.1	25.3	I	19.6
	'07/07/10 ~ '07/07/16	30	79.6	3.8	I	36.7
	'07/07/16 ~ '07/07/19	25	28.3	77.8	III	11.6
	'07/08/07 ~ '07/08/12	76	161.9	65.4	III	116.1
	'08/07/19 ~ '08/07/23	49	198.6	14.0	I	132.3
	'08/07/24 ~ '08/07/25	26	190.8	200.0	III	148.6
	'08/08/22 ~ '08/09/01	25	65.1	53.8	III	73.2
	'10/06/12 ~ '10/06/14	29	72.3	4.5	I	26.8
	'10/07/16 ~ '10/07/23	35	165.5	9.2	I	109.9
	'10/08/24 ~ '10/08/27	39	80.0	61.8	III	62.3
Hoideok	'07/08/28 ~ '07/09/01	26	97.8	150.4	III	111.9
	'10/09/09 ~ '10/09/15	65	255.7	40.6	II	247.1
	'07/08/04 ~ '07/08/06	24	84.5	0.0	I	25.1
	'07/08/29 ~ '07/09/01	37	140.7	52.9	II	93.5
	'07/09/04 ~ '07/09/14	59	94.2	149.7	III	104.2
	'08/06/28 ~ '08/07/03	26	38.8	1.4	I	11.3
	'08/07/24 ~ '08/07/30	34	44.6	50.0	II	44.0
	'08/08/15 ~ '08/08/18	26	163.4	61.3	III	101.0
Heukchonkyo	'10/07/16 ~ '10/07/19	24	68.4	3.6	I	25.4
	'10/08/12 ~ '10/08/15	40	119.1	58.1	III	75.8
	'07/08/28 ~ '07/09/01	85	193.2	78.1	III	252.8
	'08/07/19 ~ '08/07/23	46	196.0	47.0	II	172.5
	'08/08/22 ~ '08/08/27	26	78.4	61.3	III	71.8
	'10/07/16 ~ '10/07/21	42	131.2	17.9	I	80.3
Heukchonkyo	'10/08/23 ~ '10/08/25	32	82.4	32.4	I	39.4
	'10/09/09 ~ '10/09/16	64	245.6	49.3	II	276.7

3. 유역 유효우량 산정

3.1 GIS 기법을 이용한 유출곡선지수(CN) 산정

3.1.1 수문학적 토양군 분류

Hoggan (1989)는 수문학적 토양군을 강우-유출 자료 또는 분포 되어 있는 토양의 구성과 특성, 침투율을 기준으로 4가지(Type A (침투율 7.62-11.43 mm/hr), B (침투율 3.81-7.62 mm/hr), C (침투율 1.27-3.81 mm/hr), D (침투율 0.0-1.27 mm/hr))로

분류하였다. 우리나라 유역에서는 Jung et al. (1995)의 연구 결과를 바탕으로 NIAST (2007)에서 개선한 분류방법을 수문학적 토양군 분류에 적용하고 있다. 우리나라 전역에 산재해 있는 1,200여개의 토양통에 토양부호를 붙이고 토양의 침투율을 고려하여 토양부호 별로 4가지 수문학적 토양군인 A, B, C, D 중의 하나를 부여하고 있다. 본 연구에서는 수치정밀토양도(농업진흥청 제공, 1:25000)을 이용하여 대상유역의 수문학적 토양군 분류를 수행하였다. Fig. 3은 점촌유역의 수문학적 토양군 분포현황을 보여주고 있으며,

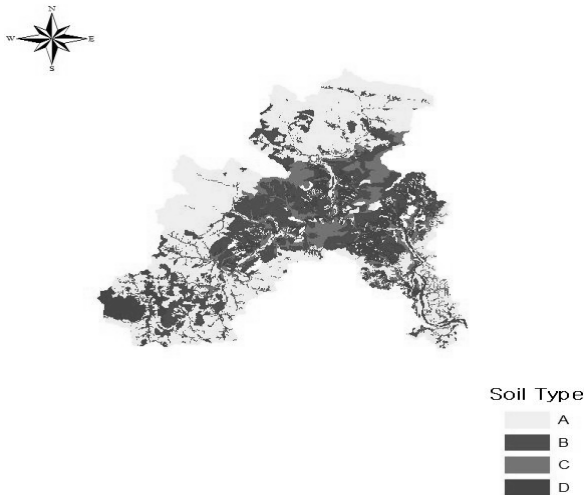


Fig. 3. Distribution of Hydrologic Soil Group for Jeomchon Basin

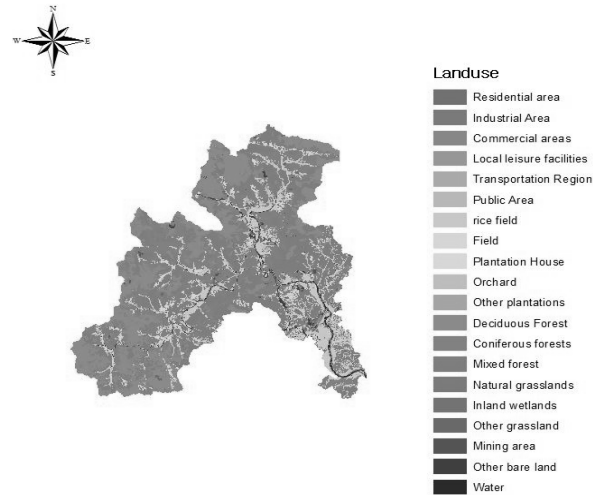


Fig. 4. Distribution of Landuse for Jeomchon Basin

Table 2. Classified Hydrologic Soil Group for Study Watersheds

Watershed	Hydrologic Soil Group	Area (km ²)	Ratio (%)
Jeomchon	A	576.41	93.4
	B	19.92	3.2
	C	10.88	1.8
	D	9.57	1.6
	Total	616.77	100.0
Jungrangkyo	A	138.69	66.4
	B	47.51	22.8
	C	7.21	3.5
	D	15.01	7.2
	Total	208.41	100.0
Hoideok	A	344.47	56.5
	B	202.15	33.2
	C	26.22	4.3
	D	36.30	6.0
	Total	609.15	100.0
Heukcheonkyo	A	212.44	69.0
	B	89.76	29.2
	C	2.48	0.8
	D	3.14	0.1
	Total	307.82	100.0

대상유역별 수문학적 토양군 현황은 Table 2에 정리하였다. 정밀도 양도를 이용하여 대상유역의 수문학적 토양군을 분류한 결과, 대상 유역에서의 수문학적 토양군 분포는 Type A의 분포가 약 50% 이상으로 가장 많은 분포를 나타내었으며, Type B, Type C, Type D 순으로 나타났다.

3.1.2 토지이용분류

NRCS-CN 방법에서 CN은 토지이용상태 및 식생피복 처리상태에 따른 수문학적 조건에 따라 분류된다. 토지이용상태 및 식생피복 처리상태는 크게 농경지, 도시지역으로 구분되며, 수문학적 조건은 수직배수가 불량하여 유출률이 높은 불량(Poor), 수직배수가 보통이어서 유출률이 중간인 보통(Fair), 수직배수가 양호하여 유출률이 낮은 양호(Good)로 구분된다(SCS, 1972). 본 연구에서는 중분류 수치지토지피복도(환경부 제공, 1:25000)와 GIS 기법을 활용하여 대상유역의 토지피복 분류체계의 따른 토지이용현황을 분류하였다. Fig. 4는 점촌유역의 토지이용현황을 보여주고 있으며, 대상유역별 토지이용현황은 Table 3에 정리하였다. 수치지토지피복도를 이용하여 토지이용상태를 분류한 결과, 흑천교 유역과 점촌 유역은 주로 산림지역(약 70% 이상)으로 구성되어 있으며, 농업지역이 약 15% 이상 분포되어 있다. 반면 중랑교 유역은 도시지역(약 43%)으로 구성되어 있으며, 회덕 유역은 도시지역이 약 15% 이상 분포되어 있으며, 또한 농업지역도 비슷한 비율로 구성되어 있다.

3.1.3 유출곡선지수(CN) 산정

본 연구에서 유출곡선지수(CN)를 산정하기 위해 MLTM (2012)에서 제시한 수문학적 토양군과 토지이용현황에 따른 유출곡선지수(AMC-II 조건)를 사용하였으며, 수치지토지피복도(1:25000)와 수치지정밀도양도(1:25000)을 이용하여 분류한 수문학적 토양군 및 토지 이용현황을 고려하여 유출곡선지수(CN)을 산정하였다. 단, 논외의 경우, 수문학적 토양군에 상관이 없이 79 (AMC-II)를 CN값으로 사용하였다. 산림의 경우, 미국 산림청(U.S. Forest Service)에서 제시한 방법에 따라 부식토의 깊이(Humus depth, H)와 압밀정도(Compactness factor, C)에 따라 수문학적 조건의 등급(Hydrologic Condition

Table 3. Landuse of Study Watersheds (unit : km²)

Landuse \ Watershed	Jeomchon	Jungrangkyo	Hoideok	Heukcheon
1. Residential area	11.15	60.75	44.50	7.47
2. Industrial area	0.93	0.77	7.34	0.02
3. Commercial areas	0.87	6.43	10.09	0.20
4. Local leisure facilities	0.06	0.57	0.99	0.07
5. Transportation region	3.87	6.52	18.29	2.35
6. Public area	0.76	15.13	11.48	2.67
7. Rice field	52.31	8.41	52.29	32.88
8. Field	36.71	5.58	40.49	21.25
9. Plantation house	0.22	0.01	0.83	0.00
10. Orchard	13.71	0.42	9.40	0.53
11. Other plantations	1.28	0.60	1.23	1.40
12. Deciduous forest	150.31	31.02	122.54	56.31
13. Coniferous forests	156.34	15.44	145.27	137.59
14. Mixed forest	168.77	44.35	89.93	34.31
15. Natural grasslands	1.67	0.67	2.69	2.29
16. Golf course	0.00	0.23	1.62	0.00
17. Other grassland	2.49	1.90	19.02	1.38
18. Inland wetlands	3.28	0.20	3.55	1.23
19. Coastal wetlands	0.00	0.00	0.03	0.00
21. Mining area	0.94	0.00	0.85	0.01
22. Other bare land	6.05	7.14	19.40	2.71
23. Water	5.05	2.25	7.32	3.13
Total	616.77	208.41	609.15	307.82

Class, HC)을 결정하였다. 우리나라에서는 산림의 유출률이 수림보다 상대적으로 높은 점을 감안하여 산림의 유출곡선지수는 HC=2 (Type A: 48, Type B: 69, Type C: 79, Type D: 85)를 적용하였다 (MLTM, 2012). Eq. (3)을 이용하여 수문학적 토양군 및 토지이용현황에 따른 CN값을 면적가중평균하여 유역 평균 CN을 산정하였다.

$$\overline{CN} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^n (A_i \times CN_i) \quad (3)$$

여기서, \overline{CN} 은 평균 유출곡선지수(AMC-II), A_{total} 은 유역 면적 (km²), A_i 는 수문학적 토양군 및 토지이용종류별 면적(km²), 그리고, CN_i 는 수문학적 토양군 및 토지이용종류별 유출곡선지수를 나타낸다.

Eq. (2)를 이용하여 대상유역에서의 AMC 조건별 유역 평균 CN값을 산정하였으며, Table 4에 정리하였다.

3.2 유효우량 산정 및 비교

본 연구에서는 유역 평균 CN을 이용하는 가중평균CN법을 적용

한 유효우량(유효우량 I)과 토지이용에 따른 소구역별 유효우량을 산정한 후 합산하는 가중평균유효우량법을 적용한 유효우량(유효우량 II)을 산정하여 비교·분석하였다.

우선, 가중평균CN법을 적용한 유효우량 I을 산정하는 방법은 아래와 같다.

- (1) GIS 기법을 이용하여 토양군별 CN과 토양군별 면적의 가중평균으로 토지이용종류별 CN 산정
- (2) Eq. (3)을 이용하여 유역 평균 CN(\overline{CN}) 산정(Table 4 참고)
- (3) Eq. (1)을 이용하여 유효우량 산정

Table 4. Areal Averaged Curve Number

Watershed	CN I (AMC-I)	CN II(AMC-II)	CN III(AMC-III)
Jeomchon	34	55	74
Jungrangkyo	46	67	82
Hoideok	49	70	84
Heukchonkyo	38	59	77

유효우량 I은 현재 실무에서 일반적으로 적용되는 방법으로, 본 연구에 적용한 결과, 점촌 유역은 0.0~64.0 mm, 중랑교 유역은 0.51~110.0 mm, 회덕 유역은 0.0~116.93 mm, 흑천교 유역은 0.00~124.79 mm로 나타났다. 점촌, 회덕, 흑천교 유역에서 일부 강우-유출 사상에 대해서는 유효우량이 발생하지 않는데, 이는 총강우량이 초기손실량보다 작아 NRCS-CN의 초기손실 조건을 만족하지 못하기 때문에 유효우량이 발생하지 않은 것이다.

가중평균유효우량법을 적용하여 유효우량 II를 산정하는 절차는 아래와 같다.

- (1) GIS 기법을 이용하여 수문학적 토양군과 토지이용종류별 CN 산정
- (2) 수문학적 토양군과 토지이용종류별로 구분된 소구역에 Eq. (1)를 적용하여 소구역 유효우량 산정

(3) Eq. (4)를 이용하여 소구역 유효우량을 면적가중평균하여 유효우량 산정

$$\bar{Q} = \frac{1}{A_{total}} \sum_{i=1}^n (A_i \times Q_i) \quad (4)$$

여기서, \bar{Q} 는 유역의(평균) 유효우량(mm), Q_i 는 수문학적 토양군과 토지이용에 따른 소구역의 유효우량(mm), A_{total} 은 유역 면적(km²), A_i 는 소구역의 면적(km²)이다.

가중평균유효우량법을 본 연구에 적용한 결과, 점촌 유역 4.24~63.4 mm, 중랑교 유역 6.36~149.6 mm, 회덕 유역 1.23~117.9 mm, 흑천교 유역 3.36~128.4 mm로 나타났다.

Table 5. Estimation of Effective Rainfalls Based on NRCS-CN Method

Water-shed	Rainfall Event	Total Rainfall (mm)	Effective Rainfall I (mm)	Effective Rainfall II (mm)	Observed Direct Runoff (mm)	P/S	Storm Event Scale
Jeomchon	'07/09/01 ~ '07/09/02	97.5	37.6	37.0	35.7	1.09	Large storm
	'07/09/04 ~ '07/09/14	65.3	16.5	20.9	33.8	0.73	Large storm
	'08/08/14 ~ '08/08/18	131.9	64.0	63.4	69.1	1.47	Large storm
	'10/07/16 ~ '10/07/21	69.4	3.3	6.1	20.2	0.33	Small storm
	'10/08/10 ~ '10/08/13	91.0	33.0	34.8	34.6	1.01	Large storm
	'10/09/11 ~ '10/09/11	96.6	0.0	4.2	47.5	0.19	Small storm
Jungrang kyo	'07/07/01 ~ '07/07/03	75.1	0.8	8.1	9.8	0.25	Small storm
	'07/07/10 ~ '07/07/16	79.6	1.3	8.7	14.2	0.26	Small storm
	'07/07/16 ~ '07/07/19	28.3	4.1	6.4	6.1	0.50	Large storm
	'07/08/07 ~ '07/08/12	161.9	110.0	110.4	61.0	2.90	Large storm
	'08/07/19 ~ '08/07/23	198.6	44.2	33.8	63.2	0.66	Large storm
	'08/07/24 ~ '08/07/25	190.8	137.1	135.2	137.5	3.42	Large storm
	'08/08/22 ~ '08/09/01	65.1	26.5	33.8	34.8	1.16	Large storm
	'10/06/12 ~ '10/06/14	72.3	0.5	7.2	10.6	0.24	Small storm
	'10/07/16 ~ '10/07/23	165.5	27.7	40.7	83.9	1.32	Large storm
	'10/08/24 ~ '10/08/27	80.0	38.1	39.9	39.1	1.43	Large storm
	'10/08/28 ~ '10/09/01	97.8	52.7	56.4	64.3	1.75	Large storm
'10/09/09 ~ '10/09/15	255.7	77.8	149.6	168.9	2.04	Large storm	
Hoideok	'07/08/04 ~ '07/08/06	84.5	3.4	7.4	8.1	0.31	Small storm
	'07/08/29 ~ '07/09/01	140.7	62.2	65.6	65.2	1.29	Large storm
	'07/09/04 ~ '07/09/14	94.2	53.7	55.5	49.2	1.94	Large storm
	'08/06/28 ~ '08/07/03	38.8	0.0	1.2	4.3	0.14	Small storm
	'08/07/24 ~ '08/07/30	44.6	4.0	6.4	15.1	0.40	Small storm
	'08/08/15 ~ '08/08/18	163.4	116.9	117.9	63.2	3.37	Large storm
	'10/07/16 ~ '10/07/19	68.4	0.9	4.3	15.5	0.25	Small storm
'10/08/12 ~ '10/08/15	119.1	75.8	76.6	61.7	2.46	Large storm	
Heukchon kyo	'07/08/28 ~ '07/09/01	193.2	124.8	128.4	124.6	2.54	Large storm
	'08/07/19 ~ '08/07/23	196.0	76.6	127.5	133.1	1.11	Large storm
	'08/08/22 ~ '08/08/27	78.4	28.7	29.8	30.6	1.03	Large storm
	'10/07/16 ~ '10/07/21	131.2	5.1	10.6	50.6	0.31	Small storm
	'10/08/23 ~ '10/08/25	82.4	0.0	3.4	28.3	0.19	Small storm
'10/09/09 ~ '10/09/16	245.6	114.3	116.5	134.4	1.39	Large storm	

Table 5는 유효우량 I과 유효우량 II의 계산 결과를 대상유역의 강우-유출 사상별로 정리한 것이다. Table 5에 나타난 바와 같이, 유효우량 II가 전반적으로 유효우량 I 보다 크게 산정되었다. 각 대상유역별로는 점촌 유역에서는 최소 -0.6~ 최대 4.4 mm, 중랑교 유역은 최소 -10.4~ 최대 71.9 mm, 회덕 유역은 최소 0.7~ 최대 4.0 mm, 흑천교 유역은 최소 1.1~ 최대 51.0 mm 정도 유효우량 II가 유효우량 I보다 높게 산정되었다. 또한, 점촌, 회덕, 흑천교 유역의 유효우량 I에서 유효우량이 발생하지 않았던 강우-유출 사상의 경우, 유효우량 II에서는 유효우량이 발생하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이, 유효우량의 시간적 분포를 살펴본 결과, 유효우량 I과 비교하여 유효우량 II는 유효우량 발생 시간이 빠르며, 유효우량의 지속시간 또한 길게 나타났다. 초기손실량에 대하여 확인해 본 결과, 유효우량 II는 유효우량 I 보다 작게 산정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 유효우량 II를 산정할 경우, 수문학적 토양군 및 토지이용종류별 소구역의 초기손실량을 개별적으로 산정하여 NRCS-CN 산정식에 적용하기 때문에 소구역별로 유효우량이 발생하기 때문이다.

3.3 강우 유출 자료를 이용한 직접유출량 산정 및 유효우량과의 비교

관측된 강우-유출 자료를 이용하여 직접유출량을 산정하기 위해서는 총유출량에서 기저유출을 제외해야 한다. 기저유출을 분리하기 위한 수문곡선 분리 방법으로는 주 지하수 감수곡선법, 수평직선 분리법, N-day법, 수정 N-day법, 가변경사법 등이 있다. 본 연구에서는 여러 수문곡선 분리 방법 중 상대적으로 간편하고 실무에서 많이 적용하는 방법인 수평직선분리법을 선택하여 기저유출과 직접유출량을 분리하였으며, 대상유역의 강우-유출 사상별로 Table 5에 정리하였다. 관측 직접유출량의 범위는 점촌 유역은 33.8~69.1 mm, 중랑교 유역은 6.1~168.9 mm, 회덕 유역은 4.3~65.2 mm, 흑천교 유역은 28.3~134.4 mm로 나타났다.

본 연구에서는 이와 같이 산정한 관측 직접유출량을 기준으로 3.2에서 산정한 유효우량 I과 유효우량 II를 비교·분석하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 유효우량 I과 관측 직접유출량과의 차이는 -53.7~91.1 mm의 범위로 나타났다. 또한 이는 유효우량 II는 유효우량 I은 Cho et al. (2004)이 제안한 연구결과와 유사하게 나타났다. 특히, 본 연구의 대상유역의 강우-유출 사상에 대해서

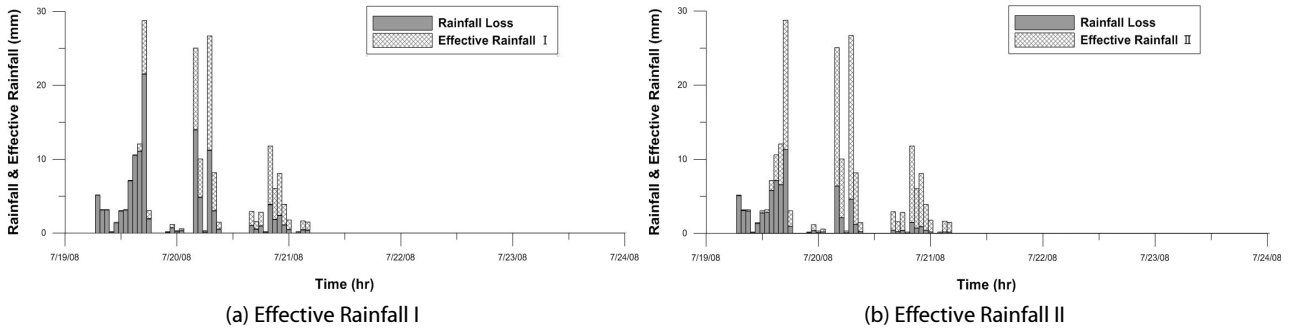


Fig. 5. Comparison of Effective Rainfall Time Distribution for Heukchongyo Basin

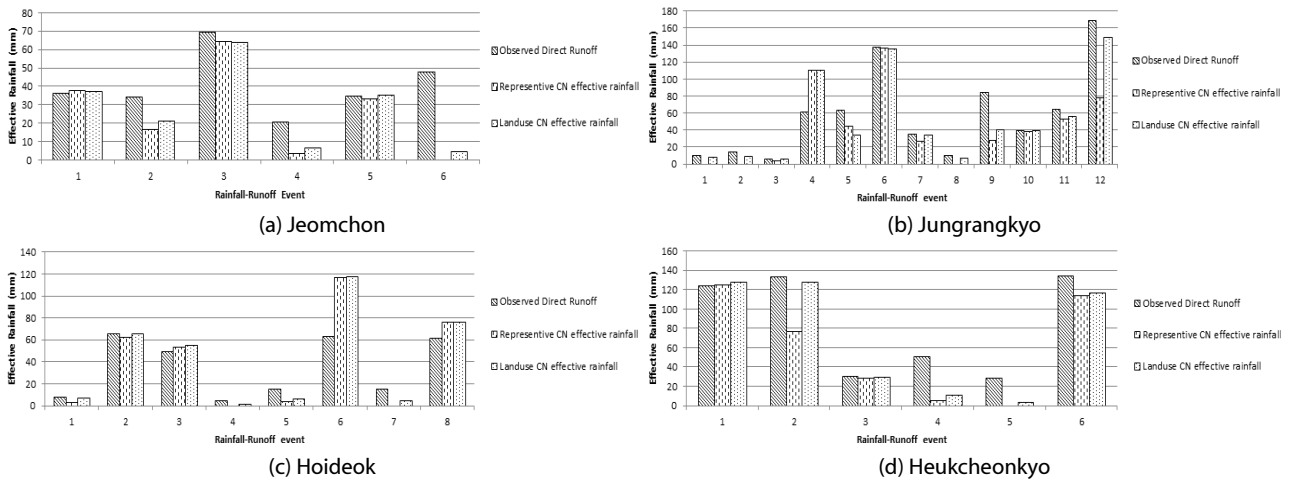


Fig. 6. Comparison of Effective Rainfalls with Observed Direct Runoff

관측된 직접유출량과의 차이를 살펴보면 최소 -53.7mm ~ 최대 91.1 mm로 나타났다. 유효우량 II는 해외 연구사례(Mogeln, 2000; Paudel et al., 2009; Ebrahimian et al., 2012)와 마찬가지로 유효우량 I 보다 크게 산정되었고, 관측된 직접유출량과 비교하여 -54.7~43.3 mm의 오차범위를 가지는 것으로 나타났다. 이러한 오차는 유효우량 I에 비해 매우 작아 관측 직접유출량에 대한 정확도가 향상된 것이다.

또한, 설계홍수량 산정 시에 고려되는 큰 강우-유출 사상에 대한

비교·분석을 수행하기 위하여 Hawkins et al. (1985)가 제안한 홍수규모의 기준인 P/S > 0.46을 적용하여 각 강우-유출 사상별 홍수규모를 부여하였다. 총 32개의 강우-유출 사상 중 홍수규모가 큰 강우-유출 사상은 21개, 홍수규모가 작은 강우-유출 사상은 11개로 나타났다. 21개의 홍수규모가 큰 강우-유출 사상에서는 주로 AMC-III 조건이 분포되어 있으며, 유효우량 II가 유효우량 I 보다 관측된 직접유출량과 가까운 값을 나타낸 강우-유출 사상은 13개로 나타났다. 11개의 홍수규모가 작은 강우-유출 사상 중

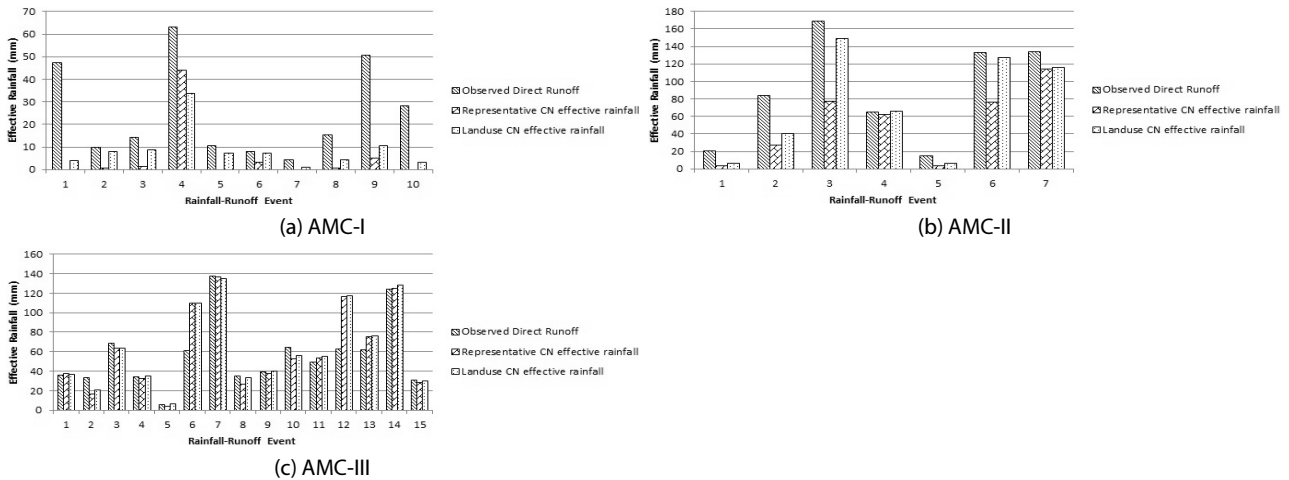


Fig. 7. Comparison of Effective Rainfalls Corresponding to AMC Condition

Table 6. Error Measures of Calculated Effective Rainfall at Watershed

	Watershed/ Storm Scale/ AMC Condition	RMSE (mm)	RRMSE (%)	MAE (mm)
Effective Rainfall I	Jeomchon	21.88	54.50	15.05
	Jungrangkyo	35.09	60.73	22.55
	Hoideok	20.88	59.18	13.75
	Heukcheonkyo	32.84	39.28	25.42
	Large Storm	31.98	44.95	19.93
	Small Storm	23.62	115.91	18.63
	AMC- I	24.68	97.90	19.59
	AMC- II	47.01	53.01	36.41
	AMC-III	20.08	35.63	11.51
	Mean	29.37	54.71	19.48
Effective Rainfall II	Jeomchon	19.47	48.49	12.92
	Jungrangkyo	21.71	37.58	13.68
	Hoideok	20.81	58.98	12.5
	Heukcheonkyo	20.76	24.84	15.5
	Large Storm	21.20	29.79	13.24
	Small Storm	20.34	99.78	14.24
	AMC- I	22.67	89.93	16.32
	AMC- II	20.23	22.81	15.60
	AMC-III	19.97	35.43	10.82
	Mean	20.90	38.93	13.58

모든 강우-유출 사상에서는 주로 AMC-I, II 조건이 분포되어 있으며, 유효우량 II가 관측된 직접유출량보다 과소 산정되었지만 정확도는 유효우량 I에 비해 향상된 것으로 나타났다.

AMC 조건별로 관측 직접유출량과 유효우량과의 비교·분석을 수행한 결과(Fig. 7), AMC-I 과 II 조건에서 산정된 유효우량은 관측된 직접유출량에 비해 최대 54.7 mm까지 과소 산정되었으며, AMC-III 조건에서 산정된 유효우량은 전반적으로 관측 직접유출량에 가까운 값을 나타냈지만, 일부 강우-유출 사상에서는 최대 91.1 mm까지 과다 산정되었다.

본 연구에서는 Eq. (5)와 같이 RMSE (Root Mean Squared Error), RRMSE (Relative Root Mean Squared Error), MAE (Mean Absolute Error)을 이용하여 관측 직접유출량과 유효우량 사이의 오차를 평가하였다. Table 6에 나타난 바와 같이, 유효우량 II는 유효우량 I보다 낮은 오차값을 가지고 있다. 이는 유효우량 II가 유효우량 I보다 정확한 직접유출량을 산정한다는 것을 보여준다. 또한 유역을 대표하는 토지이용상태에 따른 오차 분석을 통해 주로 산지 및 임야, 도시지역이 분포되어 있는 유역에서는 유효우량 II가 유효우량 I보다 관측된 직접유출량과 가까운 값을 갖는 것을 나타내었으며, 도시지역과 농업지역이 함께 분포되어 있는 유역에서는 유효우량 I와 유효우량 II와의 차이가 유사함을 확인할 수 있었다. 홍수규모별 오차분석을 수행한 결과 큰 홍수규모 및 작은 홍수규모에서 유효우량 II는 유효우량 I보다 낮은 오차값이 나타났다. 또한, AMC 조건별 오차분석을 통해 유효우량 II가 유효우량 I보다 낮은 오차가 발생하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{cal})_i^2} \quad (5a)$$

$$RRMSE = \frac{1}{Q_{obs}} \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{cal})_i^2} \times 100 \quad (5b)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{cal}|_i \quad (5c)$$

여기서, N은 강우-유출 사상의 수, Q_{obs} 는 관측된 직접유출량, Q_{cal} 는 유효우량 I, II, i 는 강우-유출 사상의 번호를 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 유역 평균 CN을 사용하여 유효우량을 산정하는 NRCS-CN 방법을 개선하기 위하여 USDA (2004)에서 제시한 토지이용종류별 유효우량을 산정하고 면적가중평균을 이용하여

유역의 유효우량을 산정하는 가중평균유효우량법을 국내 유역에 적용하였다. 또한 NRCS-CN 방법으로 산정한 유효우량을 관측 직접유출량과 비교 및 분석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 비교·분석 결과, 가중평균유효우량법을 이용한 유효우량(유효우량 II)이 가중평균CN법을 이용한 유효우량(유효우량 I)보다 전반적으로 크게 산정되었다. AMC-I 조건의 경우, 유효우량 I은 초기손실량이 총강우량보다 큰 경우가 발생하여 유효우량이 발생하지 않은 경우가 발생하였으나, 유효우량 II는 각 토지이용종류별 CN 및 초기손실량이 다르기 때문에 토지이용종류에 따른 유효우량이 발생할 수 있으며, 이로 인해 대상 유역의 대부분의 강우-유출 사상에 대해서 유효우량이 발생하였다.

관측된 직접유출량과의 비교·분석 결과, NRCS-CN 방법을 이용하여 유효우량을 산정할 경우 가중평균CN법을 이용하여 유효우량을 산정하는 방법보다 가중평균유효우량법을 적용한 유효우량이 유역의 유효우량을 전반적으로 보다 정확하게 산정하는 것으로 나타났다. 또한, 설계홍수량 측면에서 규모가 큰 강우량이 발생하는 강우-유출 사상에 대해 관측된 직접유출량과의 비교 분석한 결과, 유효우량 II가 유효우량 I보다 관측 직접유출량에 근접한 결과가 나타났으며, 대상 유역별 토지이용상태에 대하여 분석한 결과 산지 및 임야지역, 도시지역이 분포되어 있는 유역에서는 유효우량 II가 유효우량 I보다 정확한 결과를 가져왔으나, 도시지역과 농업지역이 함께 분포되어 있는 유역에서는 유효우량 I와 유효우량 II의 차이가 유사하였다. 이는 대상 유역의 CN값에 대한 공간적인 분포가 다르고, 특히 도시지역에 대한 CN값이 크게 산정되어 유출량 또한 크게 산정됨으로써 유효우량의 비교를 확인할 수 있었다. AMC 조건에 따라 관측 직접유출량과 산정된 유효우량의 비교 분석을 통해 NRCS-CN 방법을 이용하여 산정한 유효우량이 과다 또는 과소 산정이 나타났다. 대상 유역의 전반적으로 AMC-I, II 조건에서는 과소 산정되었으며, 상대적으로 도시 지역이 많이 분포되어 있는 대상 유역에서 AMC-III 조건에서 과다 산정되었음을 확인하였다. 유효우량의 시간적 분포를 비교해 보면, 유효우량 II는 유효우량 I보다 유효우량이 비교적 빠른 시간 내에 발생하였으며, 시간 분포 또한 긴 지속시간을 갖는 것으로 확인하였다. 통계학적 오차 평가를 통해 유효우량 산정기법에 따른 분석에 따른 대상 유역별, 홍수규모별, AMC 조건별로 수행한 결과 유효우량 II가 유효우량 I보다 관측 직접유출량에 가까운 유효우량을 산정한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 유역 내 강우-유출 관측자료 및 토지피복상태, 수문학적 토양군 등을 이용하여 유효우량(또는 직접유출량)을 산정하는 방법을 검토하였다. 이러한 연구결과는 현재 사용되고 있는 CN 값이 국내 유역의 토지이용특성에 따른 유출 특성을 반영하는지에 대한 타당성을 검토하는데 활용될 수 있으며, 이를 바탕으로

국내에서 효과적으로 적용할 수 있는 유효우량 산정방법에 대한 방안을 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 [한국형 설계홍수량 산정방법개발(11-기술혁신-C06)] 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Cho, H. J., O, J. H., Nam, B. H. and Jung, K. T. (2004). "A study on the determination of SCS-CN using GIS." *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, KOGIS, Vol. 12, No. 1, pp. 39-44 (in Korean).
- Ebrahimian, M., Nuruddin, A. A., Soom, M. M. and Sood, A. M. (2012). "Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed." *Caspian Journal of Environmental Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 103-114.
- Haestad (2003). *Stormwater conveyance modeling and design*.
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T. and Zevenbergen, A. W. (1985). "Runoff probability, storm depth, and curve numbers." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 330-340
- Hoggan, D. H. (1989). *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics*, McGraw-Hill, NY.
- Jun, C. H. and Yoo, C. S. (2012). "Application of the beta distribution for the temporal quantification of storm events." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 6, pp. 531-544 (in Korean).
- Jung, J. H., Jang, S. P., Kim, H. I., Jung, Y. T., Hur, K. S. and Park, H. (1995). "Runoff rate for the estimation of hydrologic soil groups." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, KSAE, Vol. 36, No. 6, pp. 12-33 (in Korean).
- Kibler, D. F. (1982). "Desk-top runoff methods for urban stormwater calculation." *Water Resources Monograph Series*, AGU, Vol. 7, pp. 87-135
- Kim, K. T. and Choi, Y. S. (2004). "A study on the estimation of effective precipitation using detailed soil map." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, KAGIS, Vol. 7, No. 2, pp. 1-15 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J. W. and Lee, J. E. (2008). "Estimation of runoff curve number for Chungju Dam watershed using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 12, pp. 1231-1244 (in Korean).
- Lee, M. W., Yi, C. S., Kim, H. S. and Shim, M. P. (2005) "Determination of suitable antecedent precipitation day for the application of NRCS method in the Korean basin." *Journal of the Korean Wetlands Society*, KWS, Vol. 7, No. 3, pp. 41-48 (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2007). *Flood estimation techniques guidelines* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2010). *Design flood estimation advanced planning study report* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2012). *Design flood estimation techniques* (in Korean).
- Mogeln, G. E. (2000). "Effect of orientation of spatially distributed curve numbers in runoff calculations." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 36, No. 6, pp. 1391-1400.
- Melesse, A. M. and Shih, S. F. (2002). "Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS." *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 37, No. 1, pp. 173-183.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST) (2007). *National institute of agricultural science and technology research report : Agricultural and Environmental Research* (in Korean).
- Oh, K. D., Jun, B. H., Han, H. G., Jung, S. W., Cho, Y. H. and Park, S. Y. (2005a) "Curve number for a small forested mountainous catchment." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 8, pp. 605-616 (in Korean).
- Oh, K. D., Jun, B. H., Yang, G. G., Ahn, W. S. and Cho, Y. H. (2005b) "Curve number for urbanized areas." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 12, pp. 1009-1020 (in Korean).
- Park, C. H., Yoo, C. S. and Kim, J. H. (2005). "Revised AMC for the application of SCS method : 1. Review of SCS Method and Problems in GIS Application." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 11, pp. 955-962 (in Korean).
- Paudel, M., Nelson, E. J. and Scharffenberg, W. (2009). "Comparison of lumped and quasi-distributed Clark runoff models using the SCS curve number equation." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1098-1106.
- Sobhani, G. (1975). *A review of selected small watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions*, M.S. Thesis, Utah State University, Logan, UT.
- Soil Conservation Service (SCS) (1972). *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Soil Conservation Service (SCS) (1985). *National engineering handbook*, Section 4, Hydrology. US 444 Department of Agriculture, US Government Printing Office, Washington, DC.
- USDA (2004). *Part 630 hydrology national engineering handbook*, Chapter 10 : Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.
- Yoo, C. S., Park, C. H. and Kim, J. H. (2005). "Revised AMC for the application of SCS method : 2. Revised AMC." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 11, pp. 963-972 (in Korean).
- Yoon, T. H. (1991). "Validity of runoff curve number method for estimating of effective rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 24, No. 2, pp. 97-108 (in Korean).